

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření viskozity oleje rotačním viskozimetrem

Viscosity Measurement by Rotary Viscometer

Student:

Tošenovský Ondřeje

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík

Ostrava 2011

Prohlašuji, že:

- Jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠBTUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé kvalifikační práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5.2011

Tošenovský
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce

Tošenovský Ondřej

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Radim 116 , 794 01, Krnov

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.5.2011

..... Tomanický

Podpis studenta

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

TOŠENOVSKÝ, O. *Měření viskozity oleje rotačním viskozimetrem: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2011, 40 s. Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Hružík, Lumír.

Bakalářská práce se zabývá měřením viskozity olejů na rotačním viskozimetru. Nejprve je popsána viskozita jako fyzikální vlastnost kapalin. Po té jsou uvedeny příklady měření viskozity různými typy viskozimetrů a zvláště je uveden způsob měření na rotačním viskozimetru Brookfield, na kterém se měření provádí a následně je popsán software tohoto přístroje a písemný jazyk B.E.A.V.I.S. Dále je popsán postup měření hustoty Mohrovými vážkami a následně je popsán postup měření závislosti viskozity na teplotě, přepočet dynamické viskozity na kinematickou a vynesení viskózní křivky a měření tokové křivky oleje. V poslední části práce jsou zhodnoceny naměřené výsledky měření.

ANOTATION OF BACHELOR THESIS

TOŠENOVSKÝ, O. *Viscosity Measurement by Rotary Viscometer: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulic Equipments, 2010, 40 p. Thesis head: doc. Dr. Ing. Hružík, Lumír.

This thesis deals with the measurement of viscosity using a rotational viscometer. First, the viscosity is described as a physical property of fluids. Following are examples of the viscosity measure in different types of viscometers and specifically describe how to measure with the Brookfield rotational viscometer, where the measurement is made and then describe the software for this device and written language B.E.A.V.I.S. The following describes the method of measuring density by Mohr dragonflies and next is described the measurement procedure of mensurement dependence of viscosity on the temperature, calculation of dynamic viscosity to kinematic viscosity and pronounced curves and measure flow curve of oil.. In the last part of the study are evaluated the measured results.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	6
Úvod	8
Cíl práce	8
1. Viskozita kapalin	9
1.1 Závislost viskozity kapalin na teplotě	10
1.2 Viskózní index	12
1.3 Závislost viskozity na tlaku	14
2. Měření viskozity kapalin	15
2.1 Průtokové (kapilární viskozimetry).....	15
2.2 Výtokové viskozimetry	16
2.3 Tělískové viskozimetry.....	17
2.4 Rotační viskozimetry	19
3. Měření hustoty Mohrovými vážkami.....	21
4. Programovatelný viskozimetr Brookfield DV-II+Pro	23
4.1 Kódy vřeten a modelů	25
4.2 Proměnné při měření viskozity.....	26
4.3 Software Brookfield.....	27
4.4 Příprava viskozimetru DV-II+Pro k měření	28
4.5 Samotný postup měření viskozity pomocí programu Rheocalc32	29
5. Měření viskozity na rotačním viskozimetru Brookfield.....	31
6. Měření tokové křivky	33
7. Závěr	37
8. Seznam použité literatury.....	39

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název veličiny	jednotka
τ	tečné napětí	[Pa]
η	dynamická viskozita	[Pa.s] [mPa.s]
$\frac{du}{dy}$	gradient rychlosti	[s ⁻¹]
ν	kinematická viskozita	[mm ² .s ⁻¹]
ρ	hustota	[kg.m ⁻³]
a	parameter závislý na druhu pracovní kapaliny	[-]
T	teplota	[K]
t	teplota	[°C]
c	parameter pro minerální oleje	[-]
VI	viskózní index	[-]
L	viskozita referenčního oleje s VI =0	[mm ² .s ⁻¹]
H	viskozita referenčního oleje s VI = 100	[mm ² .s ⁻¹]
U	viskozita zkoušeného oleje	[mm ² .s ⁻¹]
Y	kinematická viskozita měřeného oleje při 100°C	[mm ² .s ⁻¹]
p	tlak	[Pa] [MPa]
b	součinitel závislý na druhu kapalina a na teplotě	[-]
Q	objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]
A	kalibrační konstanta viskozimetr	[-]
B	korekce na kinetickou energii	[-]
E	Englerova viskozita	[°]

Úvod

Viskozita kapalin je závislá na teplotě. Při pracovní kapalině oleji tuto závislost není možno zanedbat, protože při práci hydraulických mechanismů se kapalina zahřívá a její viskozita klesá. Tím se zmenšují tlakové ztráty, kapalina se lépe protlačí netěsnostmi a klesá únosnost mazacího filmu a může dojít až k zadření. Při nízkých teplotách viskozita roste a s ní i tlakové ztráty a dochází ke zpomalení nebo až k zastavení stroje. Tím je ovlivněn i vstupní tlak do hydrogenerátoru a jeho celkové parametry a v sacím potrubí může dojít ke kavitaci. Všechny tyto vlivy jsou nežádoucí. Můžeme jím předejít právě správným zvolením oleje. Každé zařízení pracuje při jiných teplotách, a proto musíme pro každé z nich zvolit vhodný olej. Z toho důvodů je u každého oleje stanovena viskózní křivka, která udává závislost viskozity na teplotě a viskózní index (viskozita oleje při 40°C). V praxi se pak olej volí vybráním správné viskózní křivky v požadovaném rozmezí teplot a z této křivky vyčteme viskózní třídu.

Programovatelný viskozimetr Brookfield DV-II+Pro je rotační viskozimetr typu CR. Funguje na principu rotace vřetena ponořeného do vzorku měřené kapaliny a kalibrované pružiny. Viskózní působení látky na vřeteno se měří stupněm reflexe pružiny, která je měřena rotačním převodníkem. Měřicí rozsah viskozimetru je určen velikostí a tvarem vřetena, rychlosti rotace vřetena, nádobkou a úplným rozsahem kroutícího momentu kalibrované pružiny. Přístroj používá software Wingather32 umožňující snadný sběr dat a jejich analýzu nebo Rheocalc32, který umožňuje i ovládání přes počítač. Písemný jazyk B.E.A.V.I.S, umožňuje formulaci programů pro řízení viskozimetru a velmi usnadňuje měření na viskozimetru Brookfield.

Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je popsat viskozitu jako fyzikální vlastnost kapalin včetně závislosti viskozity na teplotě i tlaku. Dále uvedení příkladů měření viskozity na různých typech viskozimetrů a uvedení podrobného měření viskozity na rotačním viskozimetru Brookfield DV-II+Pro. Následně popis softwaru Rheocalc32 V2.5 a postup měření s využitím tohoto programu. V další části je vysvětlen postup měření závislosti viskozity na teplotě zadaného oleje, sestavení viskózní křivky a změření a zpracování tokové křivky.

1. Viskozita kapalin

Viskozita je míra vnitřního tření kapalin. Mezi dvěma vrstvami kapaliny pohybující se různou rychlostí, vzniká tečné napětí τ .

Newtonův zákon – tečné napětí τ je lineárně úměrné gradientu rychlosti v kolmém směru na pohyb kapaliny rov. 1.1 [6] [10].

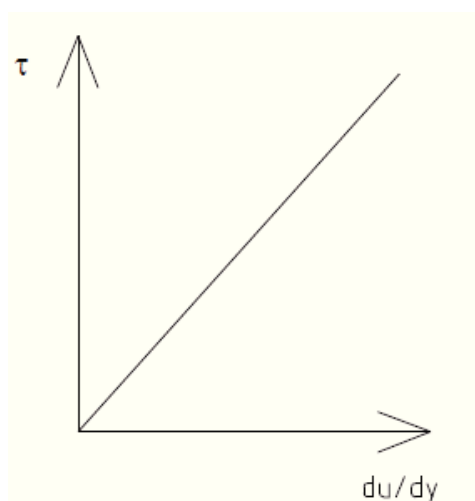
$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy} \quad (1.1)$$

kde τ je tečné napětí

du/dy je gradient rychlosti

η je dynamická viskozita

Dynamická viskozita η vyjadřuje konstantu úměrnosti tj. směrnici přímky v grafu závislosti tečného napětí na gradientu rychlosti.



Obr 2.1 Závislost tečného napětí na gradientu rychlosti [1]

Newtonův zákon viskozity platí jen u newtonských kapalin v oblasti laminárního proudění.

Newtonské kapaliny jsou kapaliny, u kterých při změně gradientu rychlosti viskozita zůstává konstantní (při daném tlaku a teplotě). U nenewtonských kapalin viskozita konstantní není a závislost tečného napětí na gradientu rychlosti má křivkový charakter[1].

Podle Newtonova zákona lze zjistit dynamickou viskozitu [6]:

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1.2)$$

V hydraulických výpočtech se používá i kinematická viskozita tj. poměr dynamické viskozity η a hustoty kapaliny [6] [1] [10].

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.3)$$

Velmi často se setkáváme i kinematickou viskozitou uvedenou v $[mm^2s^{-1}]$ nebo dříve používaná jednotka je $[cSt]$ (centistokes), kde $1 cSt = 1 mm^2s^{-1}$.

1.1 Závislost viskozity kapalin na teplotě

Viskozita kapalin je velmi závislá na teplotě. Při práci hydraulických mechanismů se pracovní kapalina zahřívá a její viskozita se stoupající teplotou klesá a tato změna může mít velký vliv na správnou funkci hydraulických mechanismů, a proto musíme této problematice věnovat zvýšenou pozornost [1].

Důsledky zmenšení viskozity kapaliny [1]:

- Klesají tlakové ztráty tzn. že kapalina klade menší odpor proti proudění
- Rostou průtokové ztráty tzn. že kapalina lépe protéká netěsnostmi
- Zhoršují se mazací schopnosti tzn. že klesá únosnost mazacího filmu a může dojít až k zadření

Tuto závislost viskozity na teplotě můžeme vyjádřit matematicky několika vztahy. Minerální oleje jsou u hydraulických mechanismů nejpoužívanější pracovní kapalinou. Pro tyto oleje lze použít tyto rovnice [1] [6]:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-a(T-T_0)} \quad (1.4)$$

Kde η_0 je dynamická viskozita při teplotě T_0 [K]

a je parameter závislý na druhu pracovní kapaliny $[K^{-1}]$

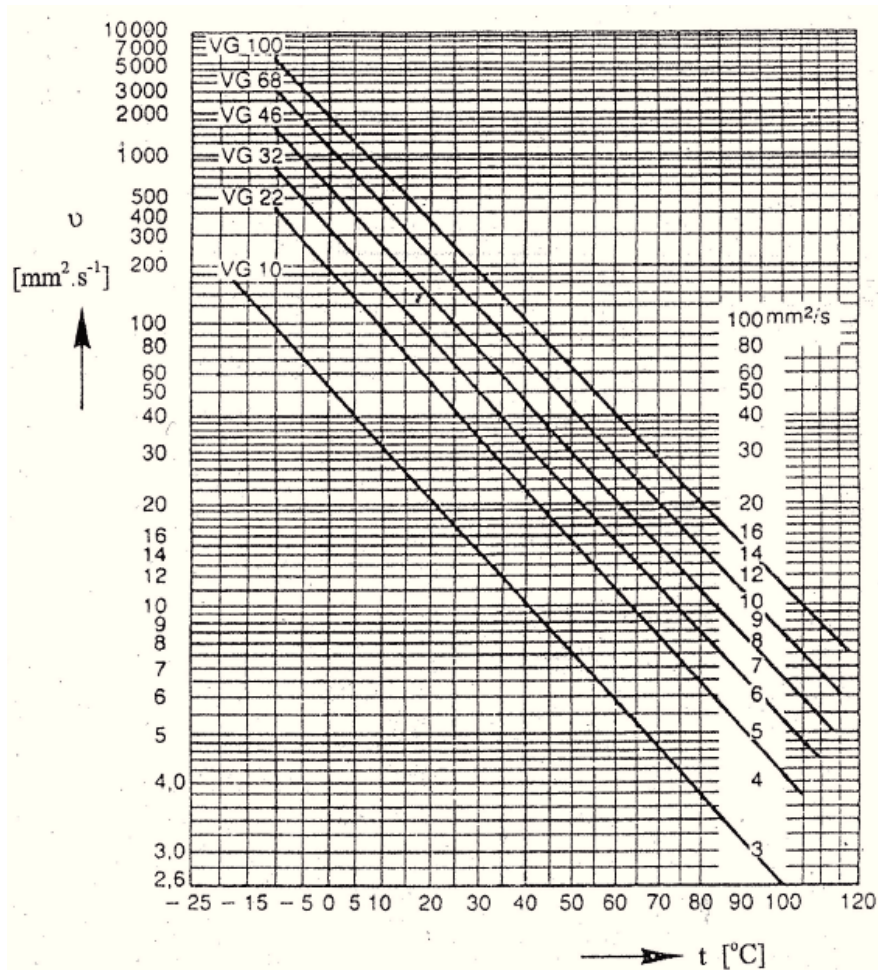
Nebo

$$\eta = \eta_0 \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^c \quad (1.5)$$

Kde η_0 je dynamická viskozita při teplotě t_0 $[^{\circ}C]$ [6]

c je parametr pro minerální oleje (rozmezí $c = 2,2$ až $3,4$ pro teplotní rozsah $t = 21$ až $54^{\circ}C$) [6]

Většinou bývají uváděny viskozity pře dvou teplotách (40 a 100°C). Z těchto dvou hodnot pak můžeme zjistit příslušný parametr a tím i průběh viskozity v daném teplotním rozmezí. Závislost viskozity na teplotě bývá udáván i graficky viskózními křivkami [10] obr. 2.2 [4] nebo tabulkou (není tak časté) [1].



Obr. 2.2 Viskózní křivky minerálních olejů [4]

Je mnoho složitých vztahů pomocí kterých lze aproximovat tuto závislost. Nejčastěji používaná je Roelantsova závislost [4], která vyhovuje spoustě minerálních a syntetických olejů i při vyšších teplotách a různých rychlostí smykové deformace:

$$\log \log(\nu + 0,7) = A - B \log T \quad (1.6)$$

Kde A,B jsou empirické vztahy

Hydraulické oleje se podle normy ISO 3448 rozdělují do viskózních tříd. Viskózní třída je hodnota viskozity oleje při 40°C. Pro požadované rozmezí teplot zvolíme správnou viskózní třídu z viskózních křivek [1].

Viskozita olejů může tedy podstatně ovlivnit pracovní parametry hydraulických mechanismů. Problémy může dělat nejen již výše zmíněná nízká viskozita, která snižuje tlakové ztráty, mazací schopnosti atd. ale také příliš vysoká viskozita, která vzniká naopak při nízkých teplotách. Vznik vysokých tlakových ztrát může mít za následek zpomalení mechanismu (někdy až k úplnému zastavení), ovlivňují vstupní tlak do hydromotoru a tím i jeho pracovní parametry, v sacím potrubí může docházet k vylučování rozpuštěného vzduchu z oleje (vznik kavitace), může dojít až k tomu že se kapalina nenasaje do hydrogenerátoru.

Z těchto důvodů výrobci hydraulických prvků v katalogích uvádějí tyto pojmy: startovací viskozita, krátkodobá minimální viskozita, provozní viskozita [1].

Startovací viskozita – maximální viskozita, při které hydrogenerátor ještě může pracovat [1].

Pro pístové hydrogenerátory bývá kolem $\nu = 1000 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$

Pro lamelové bývá do $\nu = 800 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$

Pro zubové a šroubové bývá až do $\nu = 2500 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$

Krátkodobá minimální viskozita – Na tuto hodnotu může viskozita kapaliny krátkodobě poklesnout, ale nesmí při ní zařízení trvale pracovat.

Nejčastěji tato hodnota bývá $\nu = 10 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$

Pracovní viskozita – bývá udávána v rozsahu $\nu = 16$ až $150 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$.

Optimální viskozita – rozmezí $\nu = 16$ až $36 \text{ mm}^2\text{s}^{-1}$. Při těchto hodnotách jsou optimálně vyváženy tlakové a průtokové ztráty a je při tomto provoz dosaženo nejlepší účinnosti.

Podle předpokladu teploty pracovního prostředí a mechanismu a podle výše uvedených limitních hodnot viskozity se musí správně zvolit viskózní třída oleje. Nejpoužívanější viskózní třídy jsou tyto : VG 10, 22, 32, 46, 68 a 100.

1.2 Viskózní index

Je bezrozměrné číslo vyjadřující závislost viskozity kapaliny na teplotě. Čím vyšší číslo, tím menší závislost viskozity na teplotě (viskózní křivka je plošší a kapalina lze požit pro vyšší rozmezí teplot). Viskózní index se určuje srovnáváním viskozity zkoušeného oleje s viskozitou olejů VI 0 a 100 podle normy ISO 2909. Pro toto měření potřebujeme znát kinematickou viskozitu při teplotě 40 a 100°C. Další hodnoty, které potřebujeme k výpočtu, VI odečteme z tabulky [1] [6].

$$VI = \frac{L-U}{L-H} \cdot 100 \quad (1.7)$$

Kde L je viskozita referenčního oleje s $VI = 0$ při 40°C jehož viskozita při 100°C je stejná jako viskozita zkoušeného oleje také při 100°C . [mm^2s^{-1}]

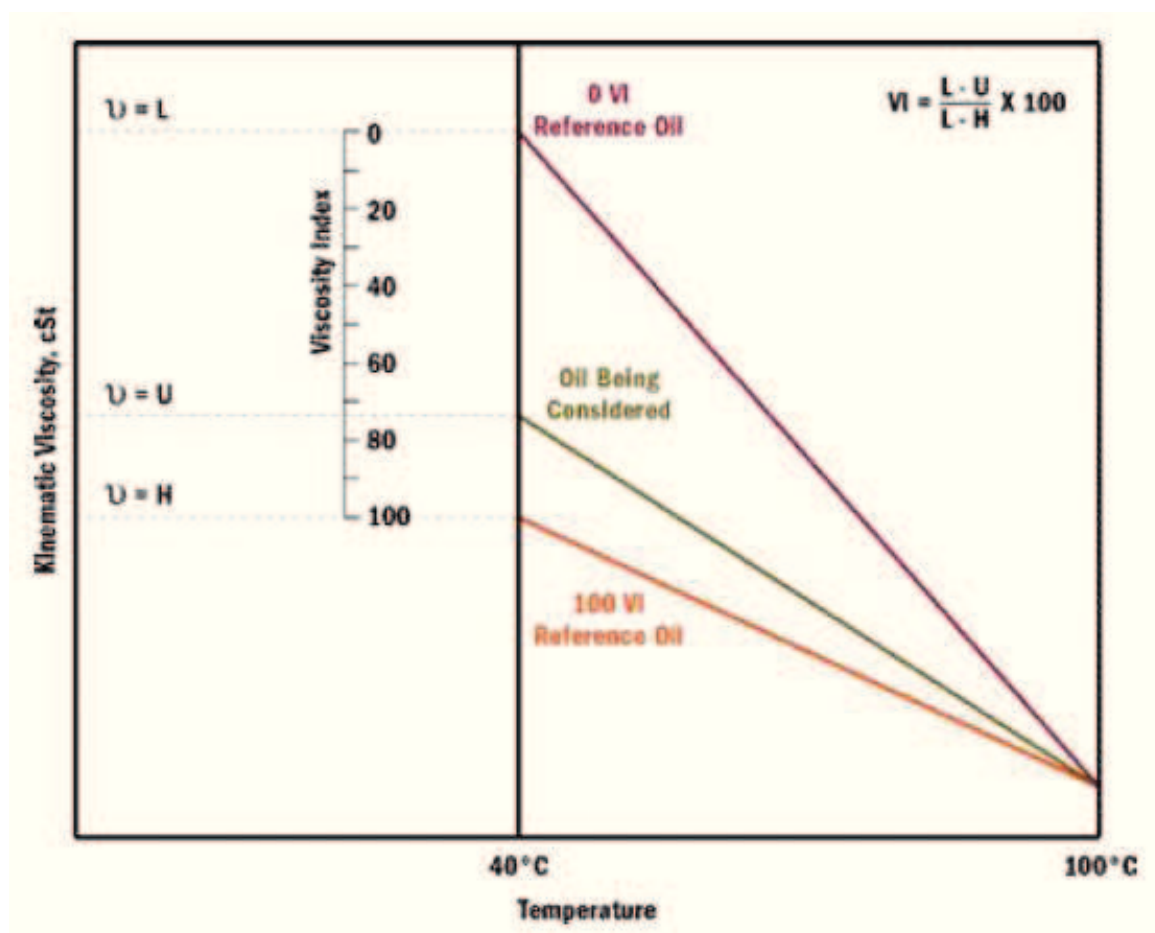
U je viskozita zkoušeného oleje při 40°C [mm^2s^{-1}]

H je viskozita referenčního oleje s $VI = 100$ při 40°C jehož viskozita při 100°C je stejná jako viskozita zkoušeného oleje také při 100°C . [mm^2s^{-1}]

VI se vždy zaokrouhluje na celé číslo. Když je VI vyšší než 100 musíme jej přepočítat podle následujícího vztahu [1]:

$$VI = \frac{10^N - 1}{0,00715} + 100 \quad (1.8)$$

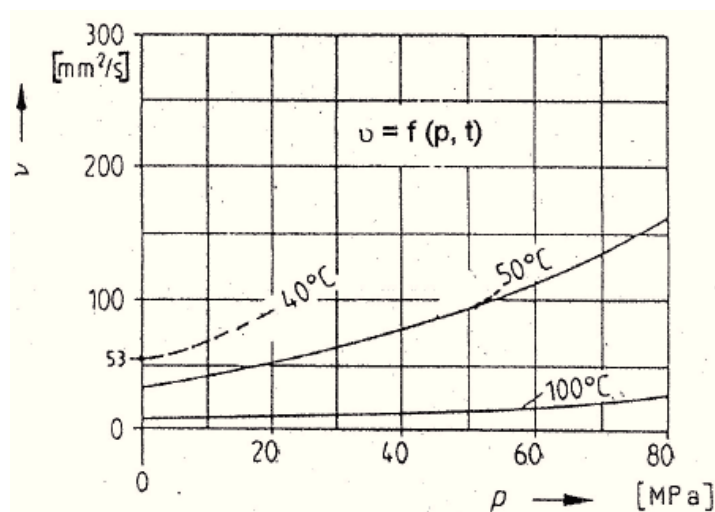
kde $N = \frac{\log H - \log U}{\log Y}$, kde Y je kinematická viskozita měřeného oleje při 100°C .



Obr. 2.3 Určení viskózního indexu [1]

1.3 Závislost viskozity na tlaku

Viskozita s tlakem roste u většiny kapalin a to hlavně u nižších teplot a až při vyšších tlacích. Tuto závislost tedy uvažujeme při tlacích nad 100MPa. Příklad závislosti viskozity na tlaku při různých teplotách je zobrazen v následujícím grafu (závislost oleje HLP 46) [1].



Obr. 2.4 Graf závislosti viskozity oleje HLP 46 na tlaku při různých teplotách [6]

Závislost viskozity na tlaku můžeme také vyjádřit matematickým vztahem obdobně jako u závislosti viskozity na teplotě [1] [6].

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{b(p-p_0)} \quad (1.9)$$

Kde η_0 je dynamická viskozita při tlaku p_0

b je součinitel, který je závislý na druhu kapaliny a na teplotě

Obvykle se hodnota koeficientu b pohybuje v rozmezí $b = (1,5 \text{ až } 3) \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$. Obecně platí že čím nižší teplota tím vyšší je hodnota součinitele [1].

Příklady hodnot součinitele b pro minerální oleje [1]:

$$20^\circ\text{C} \quad b = 2,4 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

$$50^\circ\text{C} \quad b = 2,05 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

$$100^\circ\text{C} \quad b = 1,47 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

2. Měření viskozity kapalin

Při měření viskozity nejčastěji používáme tyto viskozimetry [10]:

- Průtokové neboli kapilární viskozimetry
- Výtokové viskozimetry
- Tělískové viskozimetry
- Rotační viskozimetry

2.1 Průtokové (kapilární viskozimetry)

Tyto viskozimetry jsou založeny na Hagen-Poiseuillově zákoně, který zní: Při laminárním proudění kapaliny měrnou kapilárou o známém poloměru R a délce L je dynamická viskozita η úměrná tlakovému spádu na kapiláře p_z a nepřímo úměrná objemovému průtoku Q .

Dynamickou viskozitu pak můžeme vypočítat podle vztahu [1]

$$\eta = \frac{\pi \cdot p_z \cdot R^4}{8 \cdot Q \cdot L} \quad (1.10)$$

Kapilárních viskozimetrů je mnoho druhů, např. Ubbelohdův, Vogel-Ossag a Ostwaldův, u kterých je princip měření podobný proto si dále přiblížíme pouze jeden.

Ubbelohdův viskozimetr

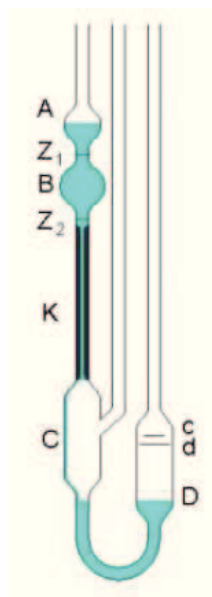
Do pravé trubičky se natáhne takové množství kapaliny, aby hladina v nádobce D ležela mezi ryskami c a d . Kapalinu vytemperujeme na požadovanou teplotu a pak uzavřeme prostřední trubici a natáhneme kapalinu do levé trubice tak, aby nádobka A byla z poloviny plná. Potom se všechny trubice uvolní a necháme kapalinu vytékat kapilárou K a měříme čas průchodu hladiny mezi ryskami Z_1 a Z_2 . Posléze kinematickou viskozitu vypočítáme z následujícího vzorce [1].

$$\nu = A \cdot \tau - \frac{B}{\tau} \quad (1.11)$$

Kde A je kalibrační konstanta daného viskozimetru

B je korekce na kinetickou energii

τ je doba výtoku kapaliny



Obr. 2.5 Ubbelohdův viskozimetr [1]

2.2 Výtokové viskozimetry

Tyto viskozimetry jsou založeny na vztahu mezi objemem kapaliny, který proteče při daném přetlaku kruhovou kapilárou za jednotku času, a viskozitou kapaliny. Kapilára je díky danému průměru krátká, proto se většina polohové nebo tlakové energie mění v kinetickou energii v důsledku změny rychlosti na vstupu do kapiláry. Velikost kinetické energie nelze určit přesně, proto se viskozita zjišťuje poměrem vzhledem k viskozitě referenční kapaliny při určité teplotě (používá se voda o teplotě 20°C) [1].

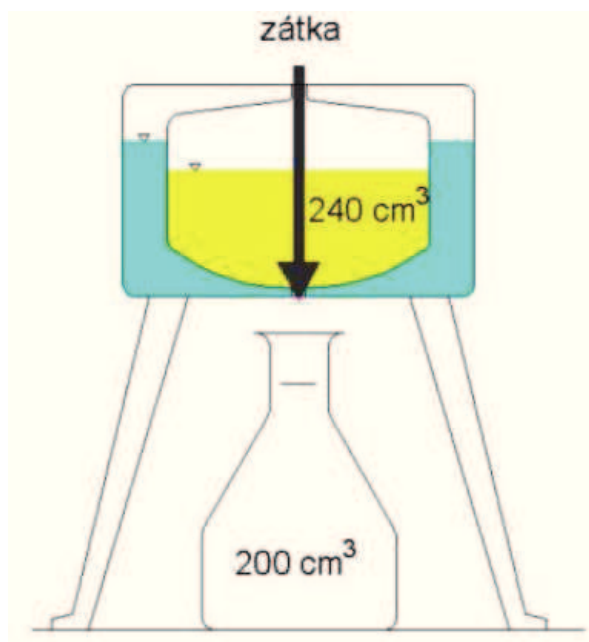
Englerův viskozimetr

Příkladem výtokového viskozimetru je Englerův viskozimetr. Viskozitu měří ve stupních Englerových [°E]. Zařízení se skládá z pozlacené válcové nádoby Ø106mm, v jejímž dně je výtoková trubička (kapilára) délky 20mm. Kapilára má kruhový průřez, přičemž se zužuje od horního průřezu o průměru Ø2,9mm na průměr Ø2,8mm. Kapilára je uzavřena zátkou (tyčinka s kuželovým koncem). Nádoba na měřenou kapalinu je obklopena lázní, pomocí které lze kapalinu zahřát na požadovanou teplotu. Do nádoby se nalije 240cm³ měřené kapaliny (hladina potom sahá do výše tří hrotů v nádobě). Viskozita ve [°E] se zjišťuje jako poměr doby τ_v výtoku stejného množství destilované vody o teplotě 20°C. Doba výtoku vody je $\tau_v = 50$ až 52s [1].

$$E = \frac{\tau}{\tau_v} \quad (1.12)$$

Pro přepočet viskozity ze $[\text{°E}]$ na kinematickou viskozitu uvedenou v jednotkách SI je možno použít empirický vztah

$$\nu = \left[7,31 \cdot \text{°E} - \frac{6,31}{\text{°E}} \right] \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.13)$$



Obr.2.6. Englerův viskozimetr [1]

2.3 Tělískové viskozimetry

Tělískové viskozimetry jsou založeny na měření rychlosti pádu tělíska např. kuličky, ve zkoušené kapalině. Viskozitu pak vypočítám podle Stokesova vztahu pro rovnoměrnou konstantní pádovou rychlost kuličky v kapalině [1]

$$\eta = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_k - \rho_m)}{9 \cdot w} = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_k - \rho_m)}{9 \cdot L} \cdot \tau \quad (1.14)$$

Kde w je rychlost pádu kuličky

ρ_k je hustota kuličky

ρ_m je hustota měřené kapaliny

r je poloměr kuličky

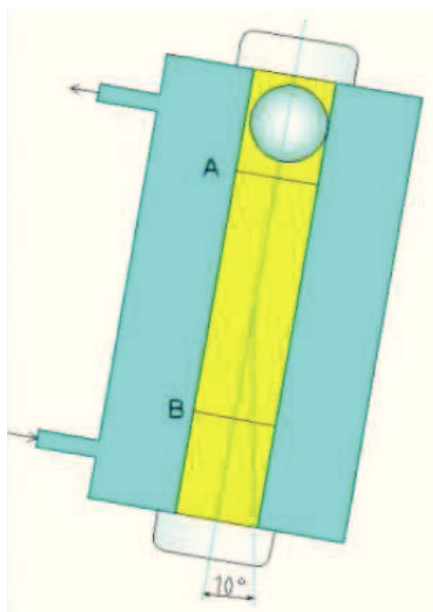
L je délka dráhy pádu kuličky

T je doba pádu kuličky

Do výpočtu také musíme zahrnout opravný koeficient, který zohledňuje vliv parametrů přístroje (průměr kuličky, průměr zkušební nádoby a délka dráhy pádu kuličky) a určuje se kalibrací měřením kapaliny o známé viskozitě [1].

Höpplerův viskozimetr

Je typickým příkladem tělískového viskozimetru. Jeho hlavní část je kalibrovaná skleněná trubice skloněná o 10° v úči vertikále. Ta se naplní zkoumanou kapalinou a měří se doba pádu kuličky mezi dvěma ryskami vzdálenými 100mm. Měrná trubice je umístěná v lázni, pomocí které lze měřený vzorek temperovat v rozsahu teplot -60 až 150°C . Tento viskozimetr je velmi přesný (nejistota měření je podle použité kuličky je max. $\pm 2\%$). Můžeme ho použít pro kapaliny i plyny o viskozitě $0,6$ až $80000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ [1].

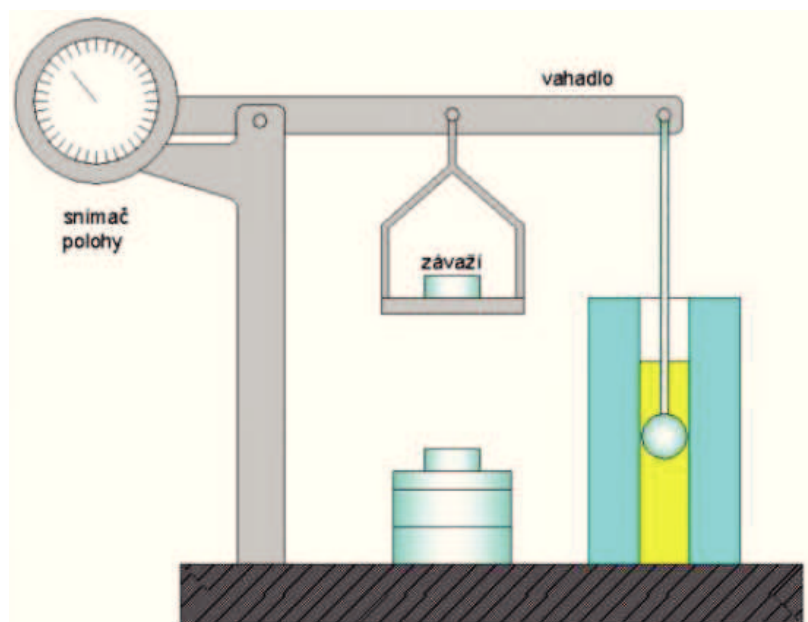


Obr. 2.6 Höpplerův viskozimetr [1]

Höpplerův Rheo-viskozimetr

Pracuje na stejném principu jako Höpplerův viskozimetr a lze použít pro měření vysokých viskozit ($0,004$ až $4000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Rozdíl je v tom, že kulička je spojena s vahadlem, na které se dá zavěsit různé závaží, díky kterým se lépe překonává zvýšený odpor kapaliny, a opět měříme dobu průchodu kuličky předepsanou dráhou. Dynamickou viskozitu vypočítáme

z obdobného vztahu jako pro Höpplerův viskozimetr jen navíc musíme předat koeficient, který zohlední vliv přidaného závaží [1].



Obr. 2.7 Höpplerův Rheo-viskozimetr [1]

2.4 Rotační viskozimetry

Princip měření rotačních viskozimetrů je založen na Couetteova proudění v mezikruží mezi dvěma souosými válci, z nichž jeden se otáčí. Měříme úhlovou rychlost nebo otáčky za danou jednotku času a kroutící moment, který vzniká díky odporu proudící kapaliny. V libovolném místě mezery na poloměru r moment vypočítáme [1]

$$M = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \tau \quad (1.15)$$

Kde h je hloubka ponoření vnitřního válce do kapaliny

τ je tečné napětí

τ vypočítáme následovně

$$\tau = \eta \cdot \frac{r \cdot d\omega}{dr} \quad (1.16)$$

Po spojení obou rovnic a po úpravách získáme následující vzorec pro výpočet dynamické viskozity

$$\eta = \frac{M}{4 \cdot \pi \cdot h \cdot \omega} \cdot \left[\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right] \quad (1.17)$$

Kde ω je úhlová rychlost

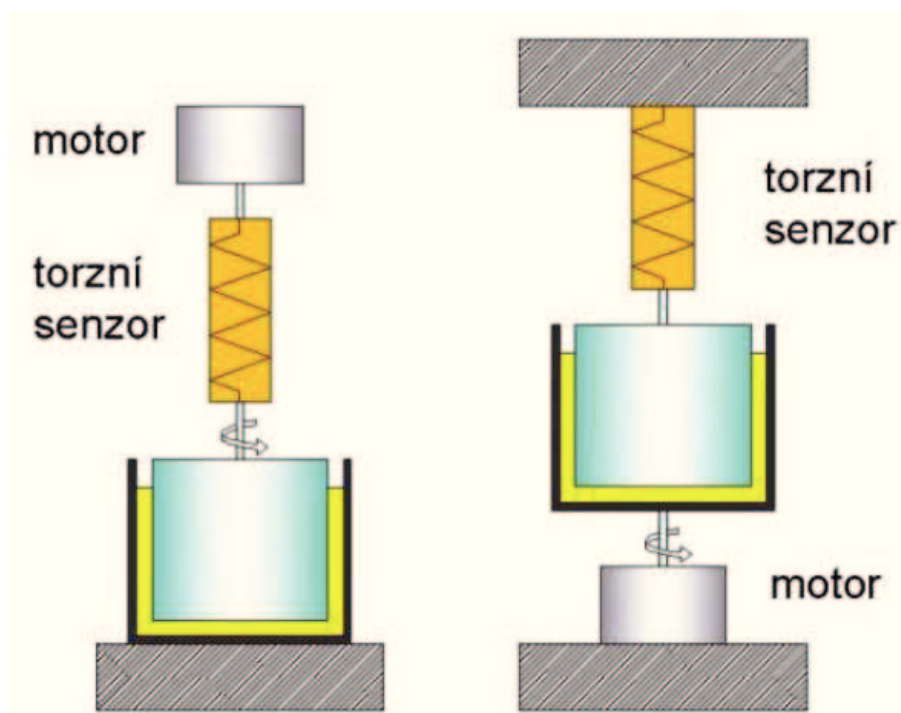
R_1 a R_2 jsou poloměry válců (mezery mezi válci)

Rotačními viskozimetry lze měřit viskozitu jako newtonských, tak neneutonských kapalin. Příměření neneutonských kapalin měříme tzv. tokovou křivku neboli reogram a viskozimetr pak označujeme jako reometr. Rotačních viskozimetrů existuje více druhů [1].

Typ CS – jsou reometry s řízením smykového napětí, to znamená, že zajišťují konstantní krouticí moment a měří se otáčky

Typ CR – jsou reometry řízením smykové deformace. Zajišťují konstantní rychlost otáček a měří se krouticí moment. Tento typ reometru se dále dělí podle toho, jestli se otáčí vnitřní nebo vnější válec.

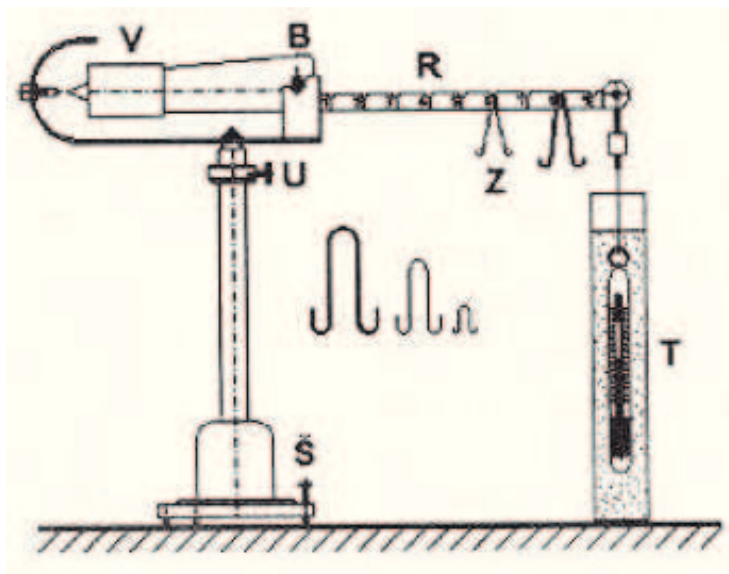
U reometrů se můžeme setkat i s jinými tělisky, než jen s válečkovými např. válec s kuželovým zakončením, kužel, pouze deska apod. [1]



Obr. 2.8 Rotační viskozimetr. Vlevo typ Searle (s rotujícím vnitřním válcem) a vpravo typ Couett (s rotujícím vnějším válcem) [1]

3. Měření hustoty Mohrovými vážkami

Mohrové vážky jsou založeny na principu Archimédova zákona. Měřené tělísko, které je umístěno na konec delšího ramene vah, je zcela ponořeno do kapaliny a je nadlehčeno vztlakovou silou. Ramena vah se uvedou do rovnováhy pomocí závaží a jejich polohou na rameni [8].



Obr. 2.9 Mohrovy vážky [1]

Stanovení hustoty oleje

Viskozimetr Brookfield měří viskozitu dynamickou (η). Proto abychom mohli zjistit kinematickou viskozitu, musíme změřit hustotu měřeného oleje ρ . Hustotu jsme změřili Mohrovými vážkami.

Technické parametry [8]:

Hydrostatická váha: typ WH; č.3946; výrobce TECHNIPROT Pruszków

Měřicí rozsah: 0,6 až 2,5 g·ml⁻¹

Objem nadnášeného tělesa : 10 ml

Přesnost měření: 0,001g·ml⁻¹

Součástí výbavy je sada závaží:

Závaží o hmotnosti 10g

Závaží o hmotnosti 1g

Závaží o hmotnosti 0,1g

Závaží o hmotnosti 0,01g

Postup měření:

Stanoví se teplota T kapaliny ve válci. Vážky se vyváží na nulovou hodnotu šroubkem na konci pravé části ramene (nulová hodnota je, když se ukazatel kryje se střední ryskou. Po vyvážení se na rameno zavěsí nadnášené těleso a ponoří se do nádoby s měřenou kapalinou tak, aby bylo vždy zcela ponořené a nedotýkalo se stěn nádoby. Po té se na břity zavěšují jednotlivá závaží 10 až 0,01g až dojde k rovnováze s nadnášeným tělesem a ukazatel se kryje se střední ryskou stupnice. Stanoví se korigovaná hustota s přihlédnutím ke vzlínivosti kapaliny a hustotě vzduchu dle vzorce [8]:

$$\rho = 0,1 \cdot m + 0,1 \cdot m \cdot e + 0,0012 \quad (1.18)$$

Kde m je hmotnost závaží vztažena na koncový břit

$$m = \sum_{i=1}^n 0,1 \cdot m_i \cdot b_i \quad (1.19)$$

Kde b_i je číslo břitu závaží č. i

m_i je hmotnost závaží č. i

$e = 0,0002$

Tab. 3.1.Tabulka naměřených hodnot [8]:

Závaží č.i	m_i	b_i
[-]	[g]	[g]
1	10	8
2	1,0	7
3	0,1	1
4	0,01	4

Hustota byla měřená při teplotě kapaliny ve válci $t=21^\circ\text{C}$

Výpočet hustoty ρ [8]:

$$m = \sum_{i=1}^n 0,1 \cdot m_i \cdot b_i = 0,1(10g \cdot 8 + 1g \cdot 7 + 0,1g \cdot 1 + 0,01g \cdot 4) = 8,714g \quad (1.20)$$

$$\begin{aligned} \rho &= 0,1 \cdot m + 0,1 \cdot m \cdot e + 0,0012 = 0,1 \cdot 8,714 + 0,1 \cdot 8,714 \cdot 0,0002 + 0,0012 = 0,8728g \cdot \\ ml^{-1} &= 0,873kg \cdot dm^{-3} = 873kg \cdot m^{-3} \end{aligned} \quad (1.21)$$

4. Programovatelný viskozimetr Brookfield DV-II+Pro

Tento viskozimetr je typu CR. Principem funkce tohoto typu reometru je rotace vřetena, které je ponořeno do vzorku měřené kapaliny, pomocí kalibrované pružiny. Rotace válcového vřetena je známá jako Couettův tok. Viskozitní působení látky na vřeteno se měří stupněm deflexe pružiny. Tato reflexe se měří rotačním převodníkem. Měřicí rozsah reometru je určen rychlostí rotace vřetena, velikostí a tvarem vřeten, dále nádobkou, v které vřeteno rotuje a úplným rozsahem krouticího momentu kalibrované pružiny [5] [9].

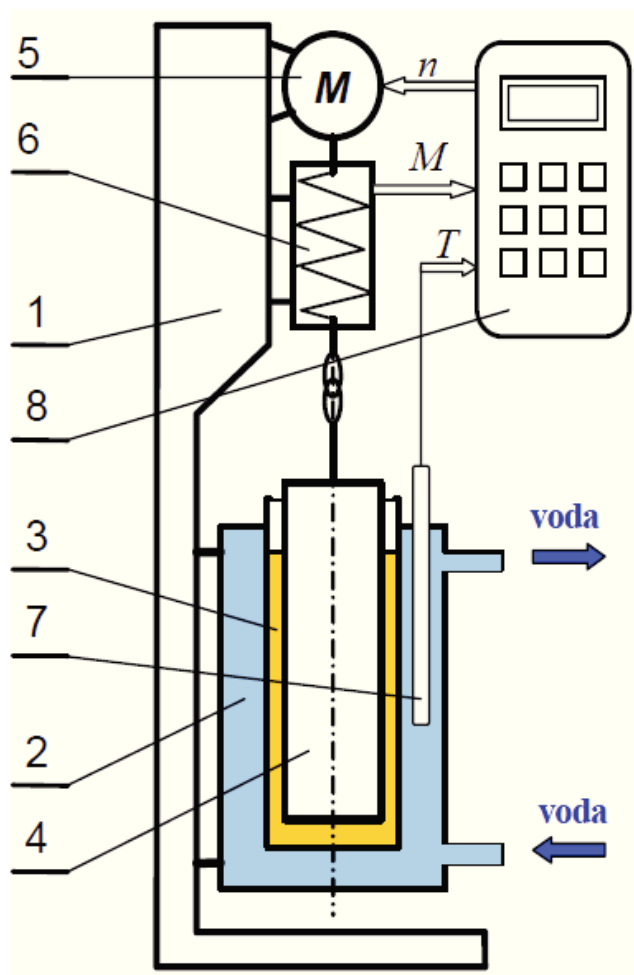
Reometr umožňuje nastavení podmínek pro měření přímo, pomocí tlačítek pod svým displejem, nebo komunikuje přes kompatibilní sériový port RS232 s počítačem. Existují dva programy pro komunikaci s programovatelným reometrem, první je Wingather32 a druhý je Rheocalc32. Program Wingather32 umožňuje sběr dat a jejich následnou analýzu, a program Rheocalc32 je určen pro kompletní externí ovládání modelu DV-II+Pro. Samotné pracovní prostředí v tomto programu, se kterým jsem pracoval je popsáno níže. Analogový výstup krouticího momentu je v rozsahu 0 až 1 V stejnosměrného proudu, což odpovídá 0 až 100% rozsahu samotného krouticího momentu. Přesnost viskozitního měření činí $\pm 1\%$ z celého rozsahu stupnice, proto se doporučuje měření v rozsahu krouticího momentu 10 až 100%. Reometr nám umožňuje snímat teplotu, což je důležité z hlediska měření viskozity v závislosti na teplotě. Nastavení teploty je provedeno pomocí TC 502 Thermostat/Controller zařízení od fy Brookfield. Toto zařízení zajistí teplotu po celou dobu měření. Analogový výstup teploty nabývá hodnot 0 až 3,75 °C až +149 °C. Opakovatelnost hodnot viskozity je zatíženo chybou $\pm 0,2\%$ [5] [9].

U tohoto typu reometru, tedy typu CR, nastavujeme otáčky vřetena na měříme moment M kapaliny ve zkušební nádobce. Moment odporu M je úměrný smykovému napětí τ , otáčky vřetena n jsou přímo úměrné rychlosti gradientu rychlosti dv/dy . Řídící jednotka reometru to automaticky přepočítává.

Viskozimetr ovládáme programem Rheocalc32 V2.5. Tímto programem je možno nastavovat otáčky a sledovat teplotu, která je nejdůležitějším faktorem ovlivňující měření. Dále je možno sledovat dynamickou viskozitu, procento krouticího momentu (které je důležité sledovat z důvodu přesnosti měření), smykové napětí, smykovou rychlost neboli deformační gradient. Dále je zde možnost odečtené hodnoty exportovat do tabulek, které následně můžeme zpracovávat pomocí tabulkového programu např. Excel. Samotné

ovládání, nastavení, sběr a přesnost dat, analýza naměřených hodnot a mnoho dalších výhod tohoto programu jsou popsány v kapitole [5] [9].

Schéma rotačního viskozimetru Brookfield



Obr. 2.10 Schéma rotačního viskozimetru [3]

1 – rám, 2 – nádobka s vodou, 3 – nádobka se vzorkem měřené kapaliny, 4 – měřící vřeteno,
5 – elektromotor pohonu, 6 – snímač momentu, 7 – teplotní čidlo, 8 – řídicí jednotka



Obr. 2.11. Viskozimetr Brookfield (vlevo) a zařízení pro regulaci teploty cirkulací vody (termostat) TC 502 Thermostat/Controller [3]



Obr. 2.12. Adapter na malé vzorky

4.1 Kódy vřeten a modelů

Vřeten pro měření na DV-II+Pro je mnoho typů a každé z nich je označeno dvouciferným kódem, které můžeme nastavit přes klávesnici na měřicím přístroji. Kód vřetena umožňuje DV-II+Pro výpočet viskozity, rychlosti deformace a smykového napětí [5].

Každé vřeteno má dvě konstanty, které se při těchto výpočtech používají. Konstanta SMC, je tzv. násobící konstanta a používá se pro výpočet viskozity a smykového napětí. Druhá konstanta, rychlosti a deformace (SRC) se zas používá pro výpočet rychlosti deformace a smykového napětí. Pokud platí $SRC=0$ pak se výpočty rychlosti deformace a smykového napětí neprovádí a hodnota zobrazená pro tyto funkce je 0. V následující tabulce je uvedeno pár příkladů typu vřeten, jejich kód, a jejich konstanty SMC a SRC. Všechny typy jsou uvedeny v literatuře [5].

Tab. 3.2. Příklady vřeten do viskozimetru Brookfield

Vřeteno	Kód	SMC	SRC
RV1	01	1	0
HA4	04	20	0
LV5	65	1280	0
SC4-16	16	128	0,2929
CPE-40	40	0,327	7,5

4.2 Proměnné při měření viskozity

Stejně jako v jiných případech měření, i zde existují proměnné, které mohou ovlivnit měření viskozity. Jsou závislé buď na testované kapalině, nebo na měřicím přístroji (viskozimetru). Proměnné závislé na kapalině se týkají reologických vlastností kapaliny proměnné závislé na přístroji se týkají konstrukci viskozimetru s použitým systémem geometrie vřeten [5].

Proměnné podmíněné viskozimetrem.

Viskozita většiny kapalin je neneutonského charakteru. Jsou závislé na deformačním gradientu a podmínkách geometrie vřetena. Specifikace vřetena a geometrie měřicí nádoby ovlivňují údaje naměřené viskozity. To znamená, že když je jeden údaj změřený při dvou rozdílných otáčkách, pak se tyto dvě hodnoty budou mírně lišit, z důvodu rozdílného deformačního gradientu. Čím vyšší rychlost otáčení vřetena, tím vyšší deformační gradient [5].

Deformační gradient je určován těmito faktory: rychlost rotace vřetena, velikost a tvar vřetena, velikost a tvar nádoby a tím pádem vzdálenost mezi stěnou nádoby a povrchem vřetena.

Opakovatelný test by se měl řídit těmito parametry [5]:

- 1) Teplota měření
- 2) Velikost nádoby na vzorek
- 3) Objem vzorku
- 4) Model viskozimetru
- 5) Použité vřeteno
- 6) Použitý ochranný rám
- 7) Rychlost rotace vřetena při měření (deformační gradient)
- 8) Délka doby před tím, než se zapíše viskozita

4.3 Software Brookfield

Existují dva programy, které můžeme použít k automatickému sběru dat a jejich analýze.

- 1) WINGATHER32 je sběrný program, který sbírá data vystupující z DV-II+Pro a umožňuje provádět grafickou analýzu a úpravu datových souborů.
- 2) RHEOCALC32 je řídicí program, který externě ovládá DV-II+Pro přes počítač a taktéž sběrný program pro účel uvedený u popisu programu WINGATHER32 [5].

Wingather32

Zde jsou uvedeny znaky a výhody tohoto programu, které zvyšují výkonnost obsluhy při provádění viskozitních testů [5]:

- 32-bitová operace zajišťující rychlý výkon
- Kompatibilní s operačními systémy Windows 95, 98, ME, 2000 a NT umožňující pružné operace
- Integrovaný program DV Loader (pro zachování testovacích programů)
- Snadno použitelné režimy sběru dat včetně automatických následných kroků (uložení dat, analýza dat, tisk dat)
- Manuální nastavení měřítka u grafických os.

- Možnost ukázání automatického rozsahu zobrazením úplného viskozitního rozsahu , který může být měřen pro jakoukoliv smykovou rychlost při dané geometrii vřetena, na displeji
- Současné vynášení až 6ti datových souborů v jednom grafu.

Program Rheocalc32 V2.5

Důležité znaky a výhody programu Rheocalc32. Které zvyšují výkonnost obsluhy při provádění viskozitních testů obsahují následující [5]:

- Kompatibilní s operačními systémy Windows 95, 98, ME, 2000 a NT umožňující pružné operace
- 32-bitová operace zajišťující rychlý výkon
- Snadný jazyk strukturovaných příkazů umožňující jednodušší programování viskozitních testů
- Zobrazování aktuálně zadaných teplotních limitů
- Možnost ukázání automatického rozsahu zobrazením úplného viskozitního rozsahu , který může být měřen pro jakoukoliv smykovou rychlost při dané geometrii vřetena, na displeji
- Současné vynášení až 6ti datových souborů v jednom grafu.

Oba dva programy využívají písemný jazyk B.E.A.V.I.S (Brookfield Advanced Viscometer Instruction Set), který umožňuje formulaci programů pro řízení viskozimetru DV-II+Pro. Tento jazyk velmi usnadňuje měření na viskozimetru Brookfield. Programy jsou formulovány na PC, potom vkládány do viskozimetru za použití DVLOADER software. DVLOADER je program, založený na Windows, dodávaný na CD, přiloženém k programovatelnému DV-II+Pro viskozimetru. Popis B.E.V.I.S. příkazů bude uveden v kapitole Měření tokové křivky [5].

4.4 Příprava viskozimetru DV-II+Pro k měření

Pro realizaci viskozitních měření používáme následující obecný postup. Jestliže používáme LV/RV/HA/HB vřetena, doporučuje firma Brookfield používání 600ml nízkých Griffinových kádinek [5].

- 1) Na DV-II+Pro viskozimetr namontujeme (LV a RV série) namontujeme ochranný rám a vložíme ho do nádoby
- 2) Ponoříme a vycentrujeme vřeteno v měrném vzorku. Hladina kapaliny má sahat po drážku vyznačující ponor, vyrytou do hřídele vřetena. U vřeten diskového typu je někdy třeba naklonit lehce vřeteno, aby se předešlo zachycení bublin vzduchu na jeho spodní části (může být pohodlnější ponořit vřeteno před napojením na viskozimetr). Vřeteno připojíme na spodek hřídele viskozimetru. Lehce zvedneme hřídel, a zašroubujeme vřeteno (levý závit). Nesmí docházet k bočním nárazům na hřídel. Ověříme správné ponoření vřetena do vzorku a vodorovné usazení viskozimetru.
- 3) Postup při výběru vřetena a rychlosti u neznámého vzorku je obecně metodou pokusu a omylu. Správný výběr je potvrzen měřením mezi (10-100)% kroutícího momentu.

Dvě obecná pravidla, které pomohou při výběru vřetena metodou pokus, omyl

- Rozsah viskozity je nepřímo úměrný velikosti vřetene
- Viskozitní rozsah je nepřímo úměrný rychlosti otáčení.

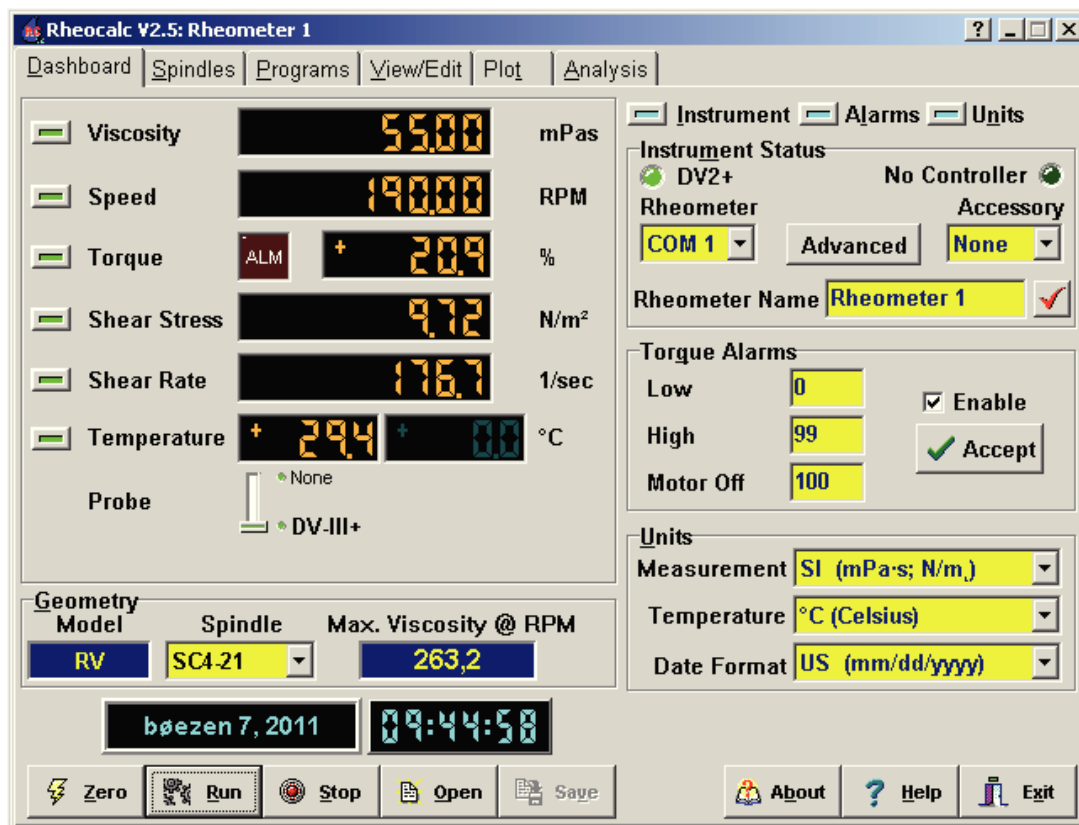
Při měření vyšší viskozity vybereme malé vřeteno a/nebo nízkou rychlost. Pokud při vybraném vřetenu/rychlosti je kroutící moment nad 100% pak snížíme rychlost, nebo vybereme menší vřeteno. Experimenty mohou dokázat uspokojivé výsledky kroutícího momentu dosažených při několika konfiguracích. V tomto případě pak můžeme použít kterékoliv vřeteno [5].

- 4) Měníme-li vřeteno nebo vzorek, vypneme motor přepínačem MOTOR/ON/OFF/ESCAPE do stavu OFF. Vřeteno před čištěním sejmem [5].

4.5 Samotný postup měření viskozity pomocí programu Rheocalc32

Před spuštěním programu Rheocalc32 je nutno zkontrolovat jestli je viskozimetr připojen sériovým portem k počítači. Nejdříve zapneme měřící přístroj a pomocí šipky vybereme možnost „External mode“. Nyní je viskozimetr připraven k obsluze pomocí programu Rheocalc32. Spustíme program na počítači a objeví se nám hlavní obrazovka ovládacího

programu. Tlačítkem „Zero“ viskozimetr vynulujeme (nulování musí probíhat bez připojeného vřetena a zátěže k viskozimetru). A teprve pak můžeme začít měřit daný vzorek.



Obr. 2.13. Spuštěný program Rheocalc32 připravený k měření závislosti viskozity na teplotě

Pomocí tlačítka „Run“, zvolíme počet otáček za minutu. Otáčky vždy volíme tak, aby se rozsah kroučícího momentu pohyboval mezi 10% až 100% (nesmíme ale přesáhnout 200 ot/min).

5. Měření viskozity na rotačním viskozimetru Brookfield

Popis měření: Použili jsem adapter na malé vzorky a tělísko SC4-21 pro 11ml vzorku.

Používal jsem program Rheocalc32, takže před zahájením měření jsem postupoval podle pokynů psaných v předchozí kapitole. Termostatem jsem reguloval teplotu podle potřeby. Měření jsem začal na 10°C a pak jsem postupně zvedal teplotu o 3°C. Po změně teploty jsem počkal na ustálení a až po té jsem odečetl naměřenou hodnotu viskozity. Odečtená viskozita je dynamická, kterou přepočteme na kinematickou a vyneseme viskózní křivku a stanovíme viskózní třídu.

Viskozitu z dynamické na kinematickou jsem přepočítal podle vztahu

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{188,2}{0,873} = 215,578 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (1.22)$$

Kde η je naměřená dynamická viskozita

ρ je hustota oleje změřená Mohrovými vážkami

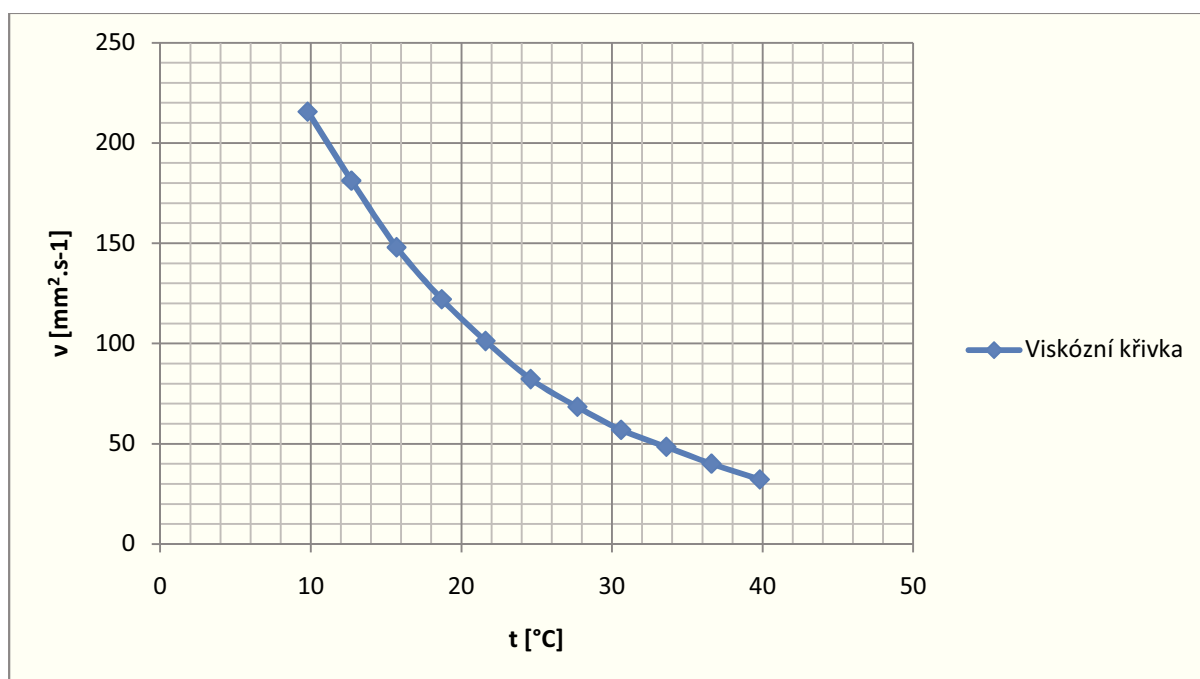
Tab. 3.3. Naměřené a vypočítané hodnoty

t	t ₁	η naměřená	ν vypočítaná
[°C]	[°C]	[mPa.s]	[mm ² .s ⁻¹]
9,8	10	188,2	215,578
12,7	13	158,2	181,214
15,7	16	129,2	147,995
18,7	19	106,6	122,108
21,6	22	88,42	101,283
24,6	25	71,84	82,291
27,7	28	59,74	68,4307
30,6	31	49,74	56,9759
33,6	34	42,37	48,5338
36,6	37	35	40,0916
39,8	40	28,16	32,2566

Teploty t_1 jsou teploty nastavené na termostatu, a t jsou hodnoty odečtené programem Rheocalc32. Tato teplotní výchylka je způsobena tepelnými ztrátami v hadičkách přivádějící operační kapalinu k měřicímu adaptéru se vzorkem.

Měření jsem ukončil na teplotě 40°C protože při vyšších teplotách krouticí moment klesl pod hodnotu 10% a další měření by bylo nepřesné. K tomu, abych mohl pokračovat v měření, by bylo třeba vyměnit použité vřeteno SC4-21 za vhodnější, pro měření nižších viskozit.

Z vypočítaných a naměřených hodnot jsem sestrojil viskózní křivku:



Obr. 2.14. Viskózní křivka

Z vypočtených hodnot jsem určil viskózní třídu měřeného oleje (viskozita při 40°C)

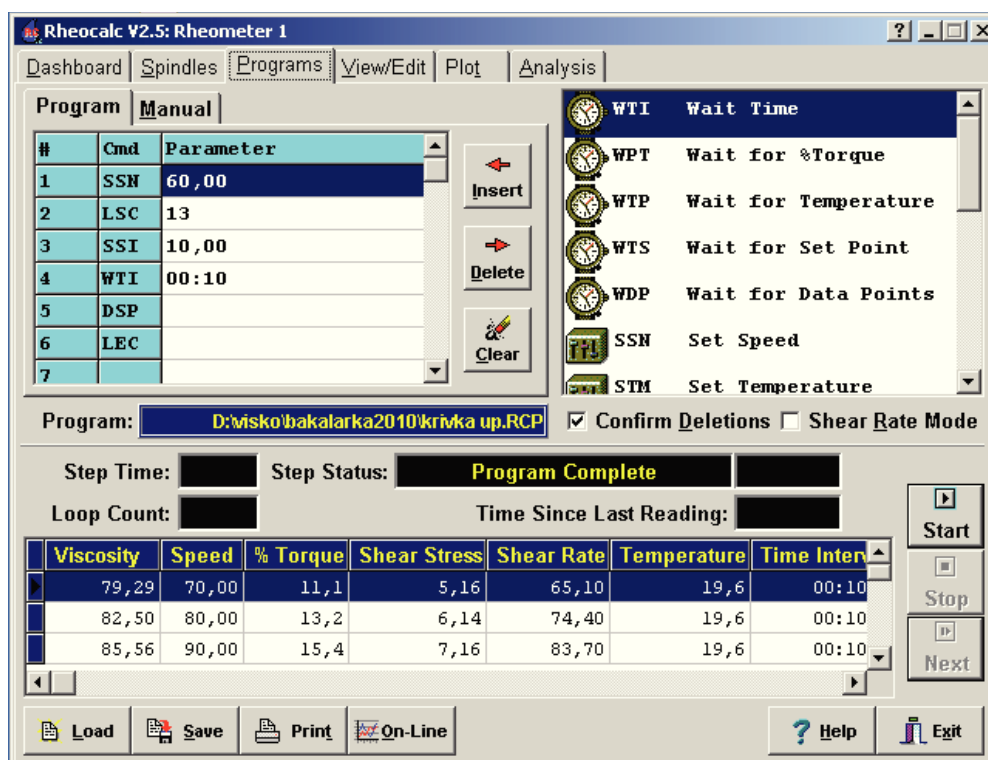
Viskózní třída měřeného oleje VG 32.

6. Měření tokové křivky

Tlačítkem „Run“ jsem si nastavil minimální otáčky tak, aby vyhovovaly rozmezí kroutícího momentu. Okno programu Rheocalc32 jsem změnil na záložku „Programs“ a tlačítkem „Load“ jsem v adresáři vyhledal zadaný program. Příkazy v zadaném programu jsem vysvětleny v následující tabulce:

Tab. 3.4. Vysvětlivky použitých příkazů [5]

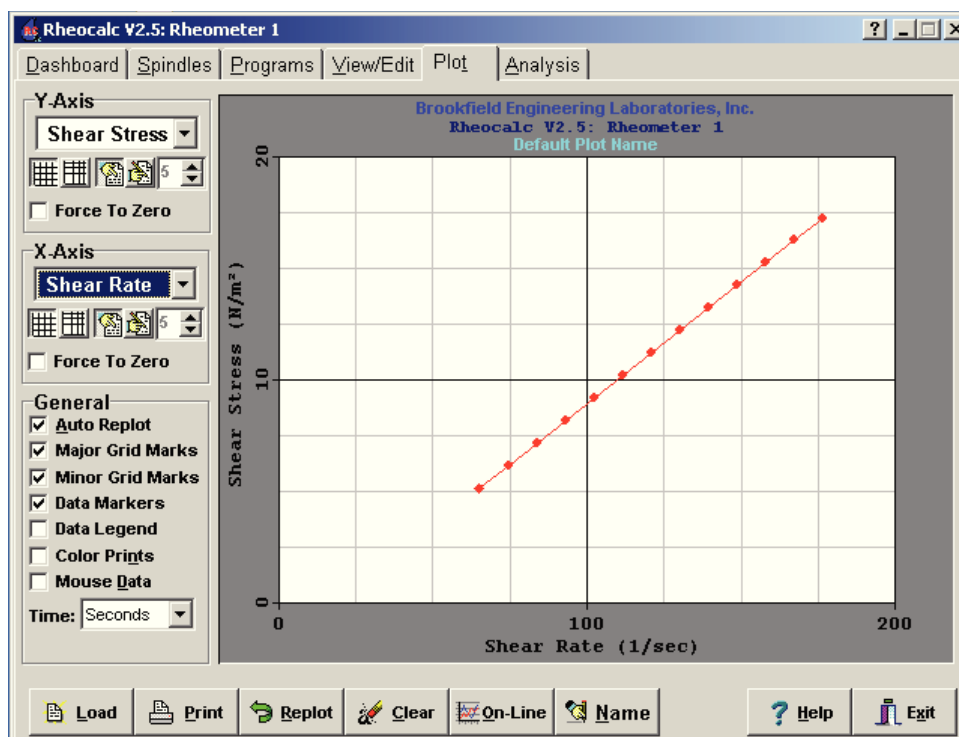
Kód příkazu	Název příkazu	Popis příkazu
SSN	Hodnota rychlosti (RPM)	DV-II+Pro začíná rotovat při specifikované rychlosti
LSC	Počet měřených kroků	Udává počet opakování pro odečtení hodnot
SSI	změna hodnoty rychlosti	Zvýší nebo sníží rychlost otáčení vřetena o nadefinovaný krok
WTI	Doba (MM:SS)	Program při tomto bodu provádí měření, dokud neuplyne zadaná doba.



Obr. 2.15. Program Rheocalc32 v plošce „Programs“

K daným příkazům jsem zadal tyto hodnoty, které jsou na obrázku 2.14. a tlačítkem start spustil měření.

Po dokončení všech kroků jsem v záložce „Plot“ zkontroloval naměřenou tokovou křivku. Podle předpokladu je závislost tečného napětí na gradientu rychlosti lineární, což je pro newtonské kapaliny typické.



Obr. 2.16. Toková křivka zobrazená programem Rheocalc32

mPas	RPM	%	N/m²	1/sec	°C	MM:SS.T
79,29	70,00	11,1	5,16	65,10	19,6	00:10,
82,50	80,00	13,2	6,14	74,40	19,6	00:10,
85,56	90,00	15,4	7,16	83,70	19,6	00:10,
88,00	100,00	17,6	8,18	93,00	19,6	00:10,
90,00	110,00	19,8	9,21	102,30	19,6	00:10,
91,67	120,00	22,0	10,23	111,60	19,6	00:10,
92,69	130,00	24,1	11,21	120,90	19,6	00:10,

Obr. 2.17. Naměřené hodnoty v tabulce v programu Rheocalc32

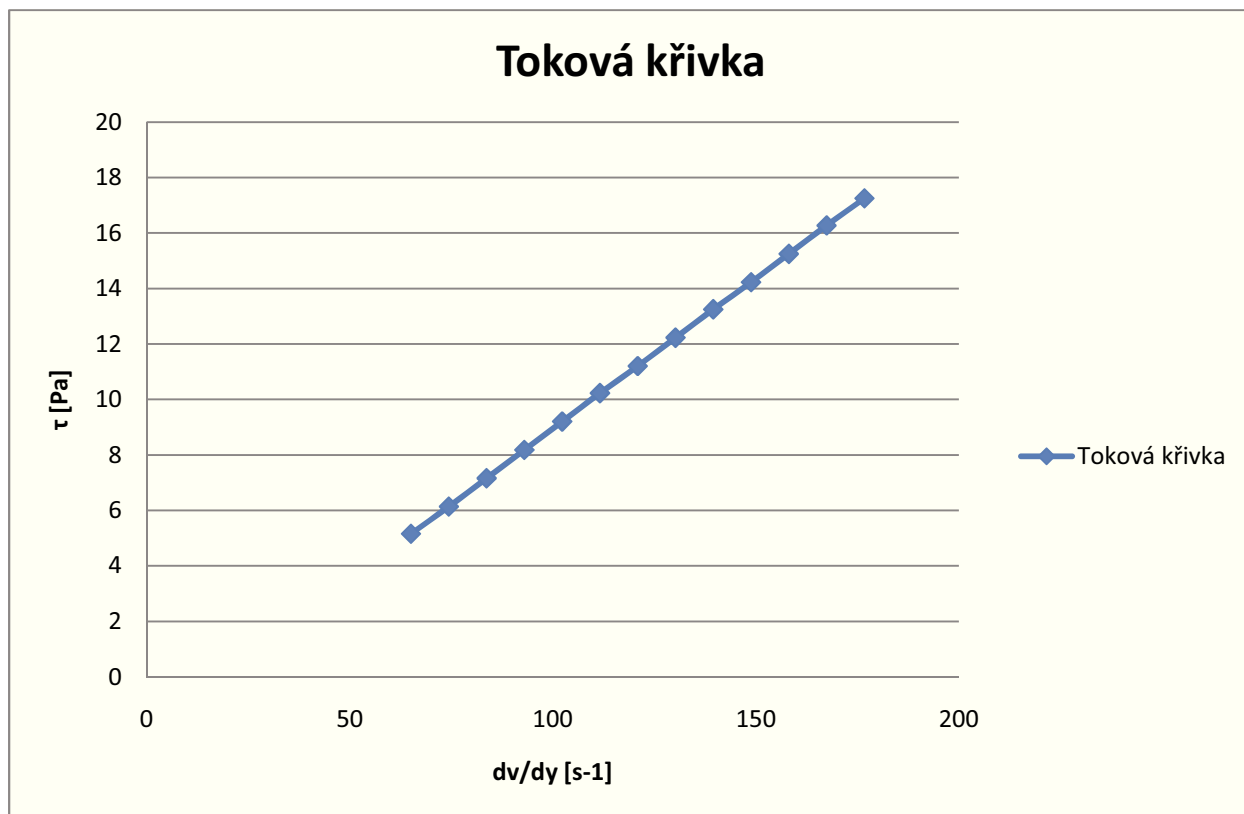
Po té jsem v záložce „View/Edit“ přes tlačítko „Export“ tabulku (Tab. 3.5) uložil do Excelu, kde jsem hodnoty zpracoval do tabulky (Tab. 3.6) a vynesl tokovou křivku.

Tab. 3.5. Naměřené hodnoty tokové křivky

Viscosity	Speed	% Torque	Shear Stress	Shear Rate	Temperature	Time Interval	Spindle	Model
79,28571	70	11,1	5,1615	65,1	19,6	00:10,2	SC4-21	RV
82,5	80	13,2	6,138	74,4	19,575	00:10,2	SC4-21	RV
85,55556	90	15,4	7,161	83,7	19,575	00:10,1	SC4-21	RV
88	100	17,6	8,184	93	19,6	00:10,2	SC4-21	RV
90	110	19,8	9,207	102,3	19,55	00:10,1	SC4-21	RV
91,66667	120	22	10,23	111,6	19,575	00:10,2	SC4-21	RV
92,69231	130	24,1	11,2065	120,9	19,55	00:10,2	SC4-21	RV
93,92857	140	26,3	12,2295	130,2	19,575	00:10,1	SC4-21	RV
95	150	28,5	13,2525	139,5	19,55	00:10,2	SC4-21	RV
95,625	160	30,6	14,229	148,8	19,575	00:10,2	SC4-21	RV
96,47059	170	32,8	15,252	158,1	19,55	00:10,2	SC4-21	RV
97,22222	180	35	16,275	167,4	19,525	00:10,2	SC4-21	RV
97,63158	190	37,1	17,2515	176,7	19,55	00:10,1	SC4-21	RV

Tab. 3.6. Zjednodušená tabulka naměřených hodnot

Viskozita η [Pa.s]	Smykové namětí	gradient rychlosti
η [Pa.s]	τ [Pa]	dv/dy [s ⁻¹]
79,28571429	5,1615	65,1
82,5	6,138	74,4
85,55555556	7,161	83,7
88	8,184	93
90	9,207	102,3
91,66666667	10,23	111,6
92,69230769	11,2065	120,9
93,92857143	12,2295	130,2
95	13,2525	139,5
95,625	14,229	148,8
96,47058824	15,252	158,1
97,22222222	16,275	167,4
97,63157895	17,2515	176,7



Obr. 2.18. Toková křivka zpracovaná v Excelu

7. Závěr

Bakalářská práce se zabývá závislosti viskozity olejů na teplotě. Nejprve je viskozita popsána jako fyzikální vlastnost kapaliny, jsou vysvětleny pojmy viskózní křivka, viskózní třída a viskózní index a je vysvětlena závislosti viskozity na teplotě a tlaku. Je uvedeno několik příkladů měření viskozity. Jsou popsány základní principy výtokových, kapilárních, tělískových a rotačních viskozimetrů. Následně je podrobně popsán postup měření s rotačním viskozimetrem Brookfield DV-II+Pro, jeho softwarem a jeho ovládáním. Je uveden samotný postup měření na tomto přístroji s využitím programu Rheocalc32 včetně následném zpracování naměřených dat. Pro přepočet dynamické viskozity na kinematickou byla změřena měrná hmotnost oleje Mohrovými vážkami.

Byla naměřena viskozita daného vzorku oleje při rostoucí teplotě rotačním viskozimetrem Brookfield DV-II+Pro za použití adaptéru pro malé vzorky a vřetena SC4-21 pro 11ml vzorku. Viskozimetr byl ovládán přes PC programem Rheocalc32 V2.5 dle stanoveného postupu. Naměřená dynamická viskozita byla přepočítaná na kinematickou a hodnoty byly uvedeny v tabulce Tab. 3.3. Následně byla sestavena viskózní křivka, ze které je možné určit viskózní třídu měřeného oleje. Nakonec byla změřená toková křivka s využitím programu Rheocalc32 a programovatelného písemného jazyka B.E.A.V.I.S. daného oleje a data byly extrahovány do tabulkového programu MS Office Excel a dále zpracována.

Měrná hmotnost oleje změřená Mohrovými vážkami a vypočtená dle postupu uvedeným v [8] $\rho = 873 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Tato hodnota je dále použita pro přepočet dynamické viskozity na kinematickou. Z naměřené viskózní křivky je zjištěno, že zadaný vzorek oleje patří do viskózní třídy 32. Oleje v této viskózní třídě mají viskózní rozmezí $[28,8 - 35,2] \text{ mm}^2/\text{s}$ při 40°C [7] a je určený pro provoz při $t = (-15 \text{ až } 77)^\circ\text{C}$ [6]. Naměřená data tokové křivky, která jsou programem Rheocalc32 zapsány do tabulky Tab.3.5. jsou vybrány hodnoty tečného napětí a gradientu rychlosti (Tab.3.6.) a je sestrojena toková křivka. Závislost tečného napětí a gradientu rychlosti je lineární (vzniklá přímka směřuje k nule), což je pro newtonskou kapalinu typické.

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, doc. Dr. Ing. Lumíru Hružíkovi, za vysvětlení tématu práce, postupu měření, zpracovávání mé bakalářské práce a za poskytnutí materiálů. Také chci poděkovat panu Sitkovi za ochotné zodpovězení mých dotazů během měření a za to že mě nechal měřit kdykoliv jsem potřeboval.

8. Seznam použité literatury

- [1] DVOŘÁK, L. Syllabus předmětu Vlastnosti tekutin. Studijní opora pro podporu studia v oboru „Hydraulické a pneumatické zařízení“ BS studijního programu „Strojírenství“ [online]. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 62 s. Dostupné na: <http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf>
- [2] HRUŽÍK, L. Experimentální úlohy v tekutinových mechanizmech [online]. VŠB-TU Ostrava, 2008, 61 s. Dostupné na: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Experimentalniulohyvtekutinovychmechanizmech.pdf>
- [3] KOZUBKOVÁ, M. a KOL. Mechanika tekutin návody pro laboratorní měření [online]. VŠB-TU Ostrava, 113s. Dostupné na: <http://www.338.vsb.cz/PDF/navod.pdf>
- [4] ŠTÁVA, P., PAVLOK, B. Mazací technika . Skripta. VŠB-TU Ostrava. 2006. 72 s. ISBN 80 – 248 – 1000 – X.
- [5] SYMPO a.s., S.K. Neumanna 136, 53207 Pardubice, PROGRAMOVATELNÝ VISKOZIMETR BROOKFIELD Model DV-II+Pro, Pracovní návody, Manuál č. M/03-165, 87 s.
- [6] PAVLOK, B. *Hydraulické prvky a systémy. Díl 1.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005. 156 s. ISBN 80-248-0857-9.
- [7] <http://oleje.cz/>
- [8] Technický manuál, Hydrostatická váha: typ WH; č.3946; výrobce TECHNIPROT Pruszków
- [9] DOBEŠ, J. *Měření tokových křivek plastických maziv.* Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010. 50s. Dostupné na: http://dspace.vsb.cz/bitstream/10084/81522/1/DOB171_FS_B2341_2302R007_2010.pdf
- [10] WILL, D.; GEBHARDT, N. *Hydraulik Grundlagen, Komponenten, Schaltungen.* 4. Vyd. Berlin – Heidelberg: Springer, 2008. 450 s. ISBN 978-3-540-79534-6